

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 135 (2009)
Heft: 5: Hors catégorie

Artikel: Unter Tage forschen
Autor: Bossart, Paul / Burrus, Fabrice / Nussbaum, Christophe
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-108213>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



01

UNTER TAGE FORSCHEN

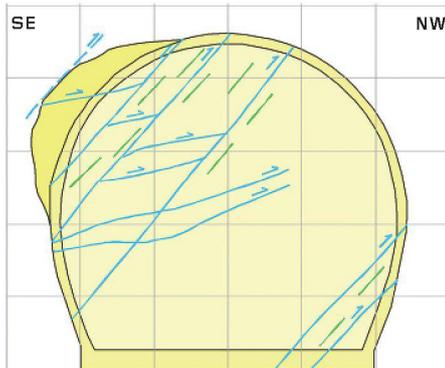
01 Reflektoren im Tunnelstollen für die Konvergenzmessungen (Foto: Mont Terri Projekt)

WAS IST OPALINUSTON?

Der rund 100 m mächtige Opalinuston entstand vor etwa 180 Mio. Jahren im flachen Meer. Im Ton sind fossile Schalen des Ammoniten «Leioceras Opalinum» weit verbreitet. Der Name ist auf den schillernden Glanz der Schalen zurückzuführen. Geotechnisch ist der Opalinuston ein Tonstein. Kommt er mit Wasser in Berührung, nimmt sein Volumen zu (Quellausdehnung bis zu 10%, Quelldrucke bis 1 MPa) und seine Festigkeit stark ab. Der mittlere Wassergehalt einer Opalinustonprobe aus dem Mont Terri beträgt fast 7%. Etwa 55% dieser Wassermoleküle sind an den Oberflächen der Tonpartikeln angelagert oder in die Tonminerale eingebaut. Die restlichen 45% füllen den verfügbaren Porenraum, können sich darin aber nicht frei bewegen, da die äusserst feinen Porendurchmesser (meist im Bereich einiger Millionstel Millimeter) die Wasserzirkulation stark beeinträchtigen. Im Felslabor Mont Terri wurden mit speziell entwickelten Messmethoden für die Durchlässigkeit Werte zwischen 10^{-12} und 10^{-14} Metern pro Sekunde ermittelt. Die sehr geringe Wasserdurchlässigkeit, der diffuse Transport und die Sorption von Radionukliden an Tonmineralien sind wichtige Aspekte bei der Überlegung zu Tiefenlagern im Opalinuston.

Seit 1996 wird in einem erweiterten Teil des Sicherheitsstollens des Mont-Terri-Autobahntunnels bei St-Ursanne im Jura zu geologischen Tiefenlagern geforscht. Die letzten zehn Jahre Forschungsarbeit haben gezeigt, dass sich Opalinuston grundsätzlich für die Lagerung radioaktiver Abfälle eignet.

2008 wurde das Felslabor erweitert, um weitere Fragen bezüglich Sicherheit und Bau eines Tiefenlagers in den nächsten fünf bis zehn Jahren abzuklären. Die rund 170m lange «Galerie 08» (Bild 3) mit den vier seitlichen Nischen wurde aus der Opalinustonformation (siehe Kasten) mit einer leichten Fräse ohne Wasser ausgebrochen. Die engen Platzverhältnisse und die Anforderungen an Ausbruchabfolge und Profilgenauigkeit, die durch vortriebsbegleitende felsmechanische Versuche vorgegeben waren, forderten diese Ausbruchmethode. Die Auflockerungszone im Gebirge wurde so limitiert und das plangemässe Sollprofil innerhalb der Toleranzen gut eingehalten. Jedoch war damit die Vortriebsgeschwindigkeit relativ gering, und es entstanden während des Fräsens sehr hohe Konzentrationen von feinem und dichtem Tonstaub. Wasser konnte beim Ausbruch zum Binden des Staubs nicht verwendet werden, da Tonminerale beim Kontakt mit Wasser aufquellen. Für den Verschluss eines geologischen Tiefenlagers ist dies positiv, da so potenzielle Risse und Klüfte langfristig versiegelt werden. Beim Bau eines Tiefenlagers würde quellender Tonstein aber an Festigkeit verlieren, und der Stollen könnte so instabil werden. Zudem liessen sich Anfangs- und Randbedingungen für künftige Experimente nicht klar definieren. Während des Ausbruchs durfte der angrenzende Strassentunnel nicht mit Staub aus dem Vortrieb belastet werden. Es mussten daher ein Ventilationssystem und eine Entstaubungsanlage installiert werden.



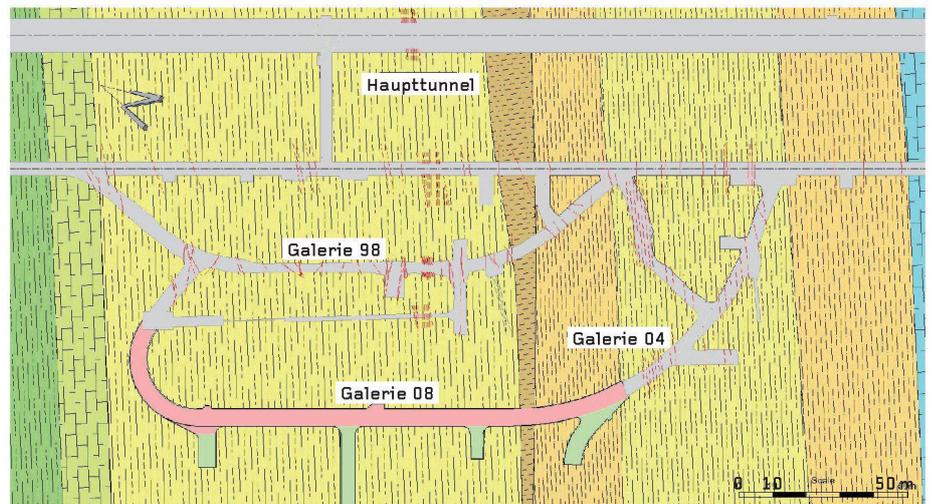
02

02 Das hufeisenförmige Regelprofil hat eine theoretische Ausbruchfläche von rund 20 m^2 . Auch ein kreisrundes Profil wurde erstmals ausgebrochen. Die Arbeiten waren zwar aufwendiger, die Spannungen konnten aber besser umgelagert werden. Ausbrüche sind dort zu erwarten, wo die geologischen Strukturen (Schichtung, tektonischer Bruch) parallel zur Tunnelwand verlaufen

- Tektonischer Bruch
- Schichtung
(1 Rasterquadrat entspricht 1 m^2)

03 Geologische Karte des Felslabors Mont Terri. Der nördliche Teil des Labors liegt in den tonigen Schichten, der mittlere Teil in den kalkhaltigen und der südliche Teil in den sandreichen Schichten

- Unterer Dogger
- Jurensis-Mergel
- Posidonien-Schiefer
- Tonhaltige Schichten
- Karbonatreiche Tonschichten
- Sandhaltige Tonschichten
- Tektonischer Bruch (Einzelfläche)
- Tektonische Scherzone (viele Einzelbrüche)
- Stollen der Galerie 08
- Nischen der Galerie 08



03

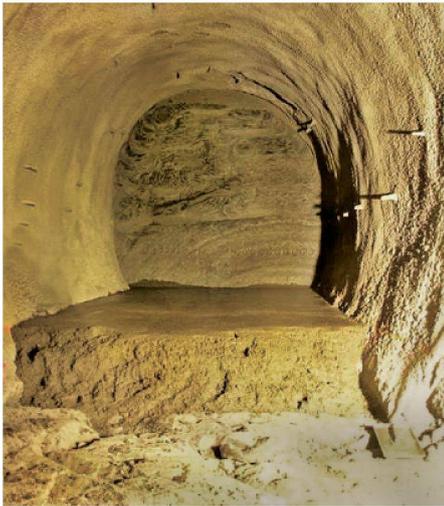
In der Regel erfolgte täglich ein Vollausbuch mit Abschlagslängen von 1.5 m . Das Gewölbe wurde nach dem Ausbruch mit einer Lage Bewehrungsnetzen, Anker und mit Spritzbeton gesichert. Sicherheitsrelevant waren vor allem mögliche Ausbrüche aus der Stollenwand und der Firse. Opalinuston hat nur eine geringe Festigkeit und kann den Spannungsumlagerungen nicht gut standhalten. Dort, wo der Tunnel in Richtung des Schichtstreichens vorangetrieben wird, gibt es bevorzugt Ausbrüche, vor allem in Bereichen, in denen die Tonschichten parallel zum Stollenprofil liegen (Bild 2). Eine weitere Schwierigkeit waren tektonische Bruchzonen, deren Festigkeit reduziert ist und wo daher Ausbrüche wahrscheinlich sind. Bei solchen Stellen wurde die Spritzbetonsicherung durch verlängerte Stahllanker und vereinzelt durch Stahlbögen verstärkt. Dadurch liessen sich der Schichtverband unter- und oberhalb eines Bruches zusammenhalten, und die Gebirgsdeformationen wurden verringert.

Zuletzt wurde die unbewehrte Betonsohle eingebracht (Bild 4). Dem Beton wurden synthetische Fasern beigemischt, um die Rissbildung bei der Aushärtung zu verhindern. Bereits beim Ausbruch der ersten paar Meter wurde klar, dass die Festigkeit und die Härte des Tonsteins höher waren, als aus den Felskennwerten ersichtlich war. Durch die starke Stollenventilation war ein Teil des Porenwassers im Tonstein verdunstet, und mit dem verminderten Wassergehalt stieg die Festigkeit des Gebirges an. Statt der geplanten durchschnittlichen Fräsleistung von $6\text{ m}^3/\text{h}$ ging es langsamer voran, der Rückstand konnte durch die Umstellung auf Zweischichtbetrieb wettgemacht werden. Im sandigen und kalkigen Typus des Opalinustons war die Festigkeit noch einmal höher, weshalb eine dritte Arbeitsschicht eingeführt werden musste.

LANGZEITÜBERWACHUNG DER STOLLEN

Ein langfristiges Unterhalts- und Überwachungskonzept garantiert während der und nach den Vortriebsarbeiten trotz minimalem Ausbau, dass die Galerien stabil bleiben und dass im Felslabor sicher gearbeitet werden kann. Das wichtigste Element bei der Überwachung besteht aus der Messung und Interpretation von Deformationen an der Tunnelwand. Mittels unterschiedlicher Deformationsmessungen – der geodätischen Verformungsmessung und der Distometermessung – lassen sich die Verformungen an verschiedenen Orten im Felslabor überprüfen und deren langfristige Entwicklung beobachten.

Bei den geodätischen Messungen werden Laser-Theodolite eingesetzt, die an der Stollenoberfläche fixierte Reflektoren anpeilen und vermessen (Bild 1). Aus den erhaltenen



04

04 Der Sohlenbeton ist im Mittel etwa 30cm stark. Er wird mit synthetischen Fasern gemischt, um die Rissbildung bei bei Sohlhebungen zu verhindern (Foto: Mont Terri Projekt)

AM BAU BETEILIGTE

Bauherrschaft: Mont Terri Konsortium

Projektleitung: Geologischer Landesdienst, swisstopo, Bern

Bauleitung: GGT SA, Porrentruy; GI AG, St-Ursanne

BAUDATEN

Bauzeit: September 2007 bis Dezember 2008

Baukosten: 2.45 Mio. Fr.

Distanzen und Richtungen kann dann die absolute Bewegung eines jeden Reflektors und somit die dreidimensionale Deformationen des Stollenrandes ermittelt werden. Bei den Distometermessungen werden sogenannte Invardrähte zwischen Bolzen, die an der Stollenwand fixiert sind, aufgespannt. Damit können die Relativbewegungen zwischen zwei Punkten des Randes (Konvergenzen) sehr genau gemessen werden. Mehrere Diagonalmessungen innerhalb eines Stollenprofils geben Aufschluss darüber, wie sich der Rand verformt. Distometermessungen sind genauer als geodätischen Messungen, lassen aber nur Rückschlüsse auf die zweidimensionale Relativverformung des Stollenprofils zu. Bei den weniger genauen geodätischen Messungen kann hingegen die dreidimensionale Absolutverformung über eine gesamte Stollenstrecke ermittelt werden.

Der Ausbruch der Galerie 08 zeigte das Deformationsverhalten von Stollen im Tongestein deutlich: Unmittelbar nach dem Ausbruch liessen sich relativ hohe Konvergenzbeiträge beobachten. Sobald die Betonsohle eingezogen wird, gehen die Deformationen stark zurück. In den Monaten nach dem Bau klingen sie weiter ab, bis schliesslich eine Stabilisierung des Tunnelabschnittes erreicht wird.

EIN TIEFENLAGER IST VORSTELLBAR

Ein Felslabor bietet realistischere Versuchsbedingungen als ein herkömmliches Labor. Die 1:1-Experimente im Felslabor liefern wesentliche Erkenntnisse über die Machbarkeit und Sicherheit von geologischen Tiefenlagern. Im Felslabor sollen Tongesteine wie der Opalinuston geologisch, hydrogeologisch, geochemisch und geotechnisch charakterisiert werden. Das Hauptziel ist es, zu zeigen, dass der Opalinuston radioaktive Stoffe über sehr lange Zeiträume (bis 1 Mio. Jahre) sicher einschliessen kann. Heute sind 13 Partner aus Europa, Japan und Kanada am Projekt beteiligt.¹ Das Felslabor dient ausschliesslich Forschungszwecken, die Lagerung von radioaktiven Abfällen kommt hier nicht in Frage.

Mit der Fertigstellung der neuen Galerie können weitere Versuche zu möglichen Tiefenlagern für radioaktive Abfälle durchgeführt werden. Die Versuchskonzepte werden zunächst durch Prognoserechnungen auf ihre Machbarkeit, ihr Design und die zu erwartenden Resultate hin überprüft. Wenn klar ist, dass dieses Ziel mit herkömmlichen Laborversuchen nicht zu erreichen ist, wird ein Testort im Felslabor bestimmt. Vor der Durchführung des Tests werden die Anfangs- und Randbedingungen direkt am Testort ermittelt. Erst dann wird mit Bohren, Instrumentieren und Messen begonnen. Nach Abschluss des Versuchs werden die Resultate ausgewertet, interpretiert und mit den Prognoserechnungen verglichen.

Offen ist nach wie vor die Frage, wie die Barrierewirkung des Opalinustons durch die mögliche Entwicklung von Wasserstoffgas infolge der Korrosion der Stahlbehälter geschmälert werden könnte. Dabei muss auch der Einfluss von Mikroben auf die Korrosion beachtet werden. Im Felslabor könnten zukünftig weitere Werkstoffe, wie etwa Kupfer und Keramik, und neue Konzepte für die Behälter erprobt und evaluiert werden. Vertieft abzuklären sind auch die Auswirkungen von über längere Zeit erhöhten Temperaturen und Gasdrücken auf die Transporteigenschaften von Bentonit und Opalinuston. Übergeordnetes Ziel ist schliesslich das Verständnis von gekoppelten Prozessen: Um den Prozessablauf beim Bau, beim Betrieb und nach dem Verschluss eines Endlagers wirklich zu verstehen, müssen hydraulische, thermische, mechanische und geochemische Vorgänge nicht isoliert, sondern in Kombination und in gegenseitiger Wechselwirkung betrachtet werden.

Paul Bossart, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Bern

Fabrice Burrus, Groupe Grands Travaux GGT, Porrentruy

Christophe Nussbaum, Institut Géotechnique SA, St-Ursanne

Anmerkung

¹ Am internationalen Mont Terri Projekt sind folgende Partner beteiligt: ANDRA, BGR, CRIEPI, ENRE-SA, GRS, HSK, IRSN, JAEA, NAGRA, NWMO, OBAYASHI, SCK/CEN und swisstopo. swisstopo betreibt das Felslabor Mont Terri als fachkompetente und neutrale Organisation des Bundes und ist verantwortlich für die Umsetzung der von den Partnern beschlossenen Forschungsprogramme.